干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

doi:10.12118/j.issn.1000-6060.2018.04.15

土体水分潜在蒸发确定方法研究进展①

夏　琼[1]，　王　旭[1]，　窦　顺[2]，　付晓丹[1]
(1　兰州交通大学土木工程学院,甘肃　兰州　730070;　2　中铁西北科学研究院有限公司,甘肃　兰州　730000)

摘　要: 以相关领域关于土体蒸发模型研究成果为基础,结合岩土工程蒸发过程的特点,对确定土体潜在蒸发量方法的发展及现状进行介绍,并对每种理论模型的适用条件及参数的确定等进行分析。结果显示:(1)特定的地区、气候条件下,通过多种理论模型对比分析,确定相对合适的理论模型估算潜在蒸发量是必要的。(2)气象参数的区域性很明显,即使是具有相似气候特征的小区域,不同气象站提供的气象资料反演的气象参数也不相同,故根据气象资料反演得到的气象参数要进行修正。(3)现有蒸发测量技术应用于岩土工程的蒸发测量中有待进一步深入研究发展。提出该课题在岩土工程领域今后的研究方向,包括土体稳定蒸发阶段蒸发机制、蒸发的滞后效应、夜间土体水分变化对蒸发的影响、通用蒸发模型的建立及实测蒸发量的尺度效应等。

关　键　词: 潜在蒸发;蒸发过程;理论模型;蒸发测量
中图分类号: S152.7.3　　**文献标识码:**A　　**文章编号:**

降雨、灌溉过后或饱和土体中水分蒸发均属于潜在蒸发。潜在蒸发量,在农学领域它是农作物生长过程必须明确的技术参数,在气象学科大范围的区域蒸发既涉及陆面实际蒸发也涉及水体的潜在蒸发,在土壤学科里土体中水量的反复变化影响着水土保持,同时它也是计算实际蒸发量的一个关键参数[1]。土体中水分蒸发过程一直是土壤学、农学和气象学等学科的研究对象,其实在岩土工程领域里,土工结构物或地基内水分的动态变化一直备受关注,因为土体中水分含量或分布的变化,会导致土体工程性质的改变,进而带来诸多工程和环境问题。但是在岩土工程中,一直关注降雨这种土体增湿作用对工程的影响,而关于干旱蒸发问题一直未得到重视,研究成果很少。这使得人们对干旱环境中蒸发而导致的工程问题的机理缺乏深入、正确认识,例如,边坡土体的开裂导致边坡失稳、地基土收缩导致的沉降、垃圾卫生填埋场隔离层开裂失效等。

土体中水分蒸发具体包括裸露地表面的蒸发和植被覆盖面冠层蒸腾两种作用,是地表热量和水分平衡的重要组成部分[2]。土体水分蒸发受能量供给条件、水汽输送条件和蒸发介质供水能力等控制。在自然界中土体水分蒸发能量主要来源于太阳辐射,水汽输送条件取决于气压饱和差及风速,蒸发介质的供水能力则由下垫面性质及植被状况决定的[3]。对于潜在蒸发量,其大小主要受能量及水汽输送条件决定,具体有太阳辐射、大气温度、风速、土体温度及湿度等。可见,土体水分蒸发是一个复杂的土体—大气间水、热平衡的问题,一直以来确定土体水分蒸发量是相关学科领域的研究重点和难点。确定土体潜在蒸发量的两种主要方法是理论模型计算法和现场测量法。已有的潜在蒸发理论模型是从影响蒸发量的主要因素出发来建立,如温度法、辐射能量法、质量传导法、水分平衡法和综合法。随着土体水热运动理论的发展,利用土体水分运动方程、大气传输过程模型、土体—大气界面的能量水分通量、温度和水汽压连续性建立土体水分蒸发模型成为可能[4]。土体蒸发过程是复杂且不可见,现场测量涉及时间和空间尺度问题,很难准确实现,现有土体蒸发测量主要从水文学法和微气象学两个方向展开[5]。

本文以土壤学、农学和气象学领域关于土体蒸发模型研究成果为基础,结合岩土工程蒸发过程的特点,对两种确定土体潜在蒸发量方法的发展过程及现状进行介绍。为蒸发作用下岩土工程土体水分

①　**收稿日期:** 2018-02-09;　**修订日期:** 2018-04-20
基金项目: 国家自然科学基金项目(41662017);甘肃省自然科学基金(1506RJZA030)
作者简介: 夏琼(1977-),女,博士研究生,副教授,从事岩土工程方面研究.E-mail:xemily@163.com

场变化规律分析提供理论依据，确定了数值模拟分析时蒸发边界条件的控制参数及其取值方法。

1 土体中水分蒸发的过程

土体水分蒸发的过程是土体孔隙中的水分通过蒸发面（土—气界面）进入大气，从而造成土体水分逐渐减少，土体表层逐渐变干的过程[2]。土体的蒸发过程与土、大气的物理参数有关，如湿度、蒸汽压力、温度梯度、太阳辐射、土—气界面处空气湍流等，是一个非常复杂的过程。土体蒸发的产生和维持必须满足3个条件[2,4,6]：持续热能的供给以满足蒸发潜热的要求；大气中的蒸汽压必须小于土体表面的蒸汽压，以保证水蒸汽以扩散或对流方式进入大气中；土体中必须有持续的水分供应到蒸发面，以满足蒸发的需要。

土体水分蒸发过程分为三个阶段，这一现象早已被室内和现场试验证实[7-8]。对于降雨之后或饱和土体的蒸发过程，也就可以分为如下三阶段：(1)初期常蒸发速率阶段，土体中水分足够满足蒸发要求，蒸发速率仅受大气条件控制，即潜在蒸发率。(2)蒸发速率减小阶段，随着土体表面含水率减小，土体中水分不能足够快的传送至表面，蒸发发生在土体表面及以下一定土层内，蒸发包括液态水蒸发和汽态水扩散两个过程，蒸发速率受控于土体含水率和孔隙通量。(3)蒸发消滞阶段，即水蒸汽扩散阶段，此时土体表层达到风干状态，蒸发面不在土体表面，而在地表干土层底部，土体孔隙中的液态水在土壤热通量的作用下汽化，通过扩散作用穿过土体表层干土层传送至土体表面，最后逸出进入大气，此阶段蒸发速率受下层土体中的含水率、固液表面分子间的吸附力控制。

2 土体水分潜在蒸发模型

2.1 Dalton 模型

Dalton 模型是最早的潜在蒸发量计算公式，以水汽质量传输理论为基础，早在1802年被提出[9]。

$$E_0 = f(u)(e_s - e_a) \quad (1)$$

式中：E_0 为自由水面的日蒸发量（$mm \cdot d^{-1}$）；e_s 为水面温度对应的饱和水汽压（hPa）；e_a 为水面以上指定高度处的实际水汽压（hPa）；$(e_s - e_a)$ 为水汽压差（hPa）；$f(u)$ 为风速函数，u 为风速（$m \cdot s^{-1}$）。

从式(1)可以看出，决定 E_0 的气象因素为风速和水汽压差。实际应用中水面温度难确定，常用大气温度下的饱和水汽压 e_0 来代替 e_s；e_a 也等于露点温度下饱和水汽压，两者均可用 Bosen（1960）公式[10]计算。

风速函数取决于风速的观测高度及水汽压的观测高度等。后来的许多修正 Dalton 模型均是对风速函数的修正，实际应用中的风速函数有线性函数、二次函数、幂函数等[11]。实际上风速函数是综合了水汽压差以外的各种影响潜在蒸发量的气象因素，故有修正风速函数中不仅考虑风速，还会考虑水—气温差或相对湿度这些因素，如陈惠泉等[12]考虑水—气温差的风速函数来修正 Dalton 模型，在全国得到通用；SINGH V P 等[9]总结了修正 Dalton 模型的几种表达形式，风速函数也有包含考虑水—气温差或相对湿度等不同因素。

2.2 Thornthwaite 模型

Thornthwaite 模型[13]（1948）属于温度法，见式(2)，它是基于美国中东部地区的试验资料，并假设干湿空气没有平流，潜热与显热之比为常数而提出来的，它是月尺度模型。主要以月平均气温为依据，并考虑纬度因子（日照时间）建立的经验公式。所需的气象数据为月平均气温、月平均白昼时间。

$$E_0 = 16.0\left(\frac{10.0T_{av}}{I}\right)^a \times \frac{N}{360} \quad (2)$$

式中：E_0 为月潜在蒸发量（$mm \cdot mon^{-1}$）；T_{av} 为月平均气温（℃）；I 为年热量指数；N 为月平均日照时间（h）；a 为常数。

年热量指数 I 见式(3)。

$$I = \sum_{i=1}^{12}(0.2T_{avi})^{1.514} \quad (3)$$

常数 a 为年热量指数 I 的函数，见下式：

$$a = 6.75 \times 10^{-7} I^3 - 7.71 \times 10^{-5} I^2 + 1.7912 \times 10^{-2} I + 0.49239$$

改进的 Thornthwaite 模型[14]为：

$$E_0 = \begin{cases} 0 & T_{av} < 0℃ \\ 16C\left(\frac{10.0T_{av}}{I}\right)^a & 0℃ \leq T_{av} \leq 26.5℃ \\ C(-415.85 + 32.24T_{av} - 0.43T_{av}^2) & T_{av} > 26.5℃ \end{cases} \quad (4)$$

式中：C 为与日长和纬度有关的调整系数，$C = \frac{N}{360}$；

N 为最大可能的月日照时长(h)。

2.3 Penman 模型

Penman 基于能量守恒定律及空气动力学理论,考虑多个气象因素,包括净辐射量、风速、空气压力和温度,提出了 Penman 模型[15-16](1948)。

$$E_0=\frac{\frac{\Delta}{\Delta+\gamma}(R_n-G)}{\lambda}+\frac{\gamma}{\gamma+\Delta}E_a \tag{5}$$

式中:E_0 为潜在蒸发量(mm·d^{-1});Δ 为饱和水汽压与温度曲线斜率(kPa·℃$^{-1}$);R_n 为净辐射(MJ·m^{-2}·d^{-1});G 为土壤热通量(MJ·m^{-2}·d^{-1});λ 为水汽化潜热,$\lambda=2.45$ MJ·kg^{-1};γ 为干湿计常数(kPa·℃$^{-1}$);E_a 为空气动力所引起的水汽蒸发项(mm·d^{-1}),其表达式见式(1)。风速函数 $f(u)=0.263(1+0.537u_2)$,u_2 为 2 m 高度处平均风速(m·s^{-1})。

Penman 模型(1948)中通常忽略了土壤热通量 G,净辐射 R_n 为:

$$R_n=(1-\alpha)R_s-\sigma T_a^4(0.56-0.092\sqrt{e_a})\left(0.10+0.90\frac{n}{N}\right) \tag{6}$$

式中:R_s 是短波太阳辐射(mm·d^{-1});α 是表面系数;σ 是 Stefan-Boltzman 常数,取 5.67×10^{-8} W·m^{-2}·K^{-4};T_a 是平均气温(K);e_a 为实际的水汽压(T_a 温度下)(Pa);n/N 是实际与可能每天日照时长之比。

1977 年,联合国粮食组织 FAO 提出潜在蒸发量计算标准公式 FAO24-Penman 公式[17]:

$$E_0=c[W\cdot R_n+(1-W)\cdot f(u)\cdot(e_s-e_a)] \tag{7}$$

式中:E_0 为参考作物蒸发量(mm·d^{-1});W 为与温度相关的权重系数;R_n 是净辐射量(mm·d^{-1});$f(u)$是风速函数,见式(8);(e_s-e_a)为平均温度时的饱和水汽压与实际水汽压差(Pa);c 是白天与夜晚气候条件的修正系数。

R_n 估算公式类似式(6),只是式中 0.56 改为 0.34,0.092 改为 0.044。

$f(u)$风速函数为式(8)。

$$f(u)=0.27\left(1+\frac{u}{100}\right) \tag{8}$$

式中:u 是 2 m 高度处 24 h 内的平均风速(km·d^{-1})。

权重系数 $(1-W)=\frac{\gamma}{\gamma+\Delta}$,$W=\frac{\Delta}{\Delta+\gamma}$,各符号意义同式(5)。

白天与夜晚气候条件的修正系数 c 是根据最大相对湿度 RH_{max}、短波太阳辐射 R_s、白天风速 u_{day} 及白天与晚上风速度之比 u_{day}/u_{night} 查表确定的。

2.4 Blaney-Criddle 模型

Blaney-Criddle (1950) 模型[18]适合于干旱半干旱地区植被地面的蒸发估算,在美国西部得到广泛应用。模型公式的表达形式为:

$$E_0=k\,p\,(0.46T_a+8.13) \tag{9}$$

式中:E_0 为参考作物的潜在蒸发量(mm·d^{-1}或 mm·mon^{-1}),单位取决于计算时段是一天或一个月;T_a 为计算时段内平均气温(℃);p 为计算时段内白昼时间占全年白昼时间的比例(%);k 为月尺度消耗使用系数,取决于植物种类、位置和季节,在作物生长期(5~10 月),取值范围 0.5~1.2。

2.5 Hamon 模型

Hamon 于 1961 年针对任意气候条件下植被覆盖地面,提出基于温度的蒸发模型[19],其公式为:

$$E_0=CD^2\,P_t/100 \tag{10}$$

式中:潜在蒸发量 E_0 单位为(mm·d^{-1});C 为无量纲的经验系数,等于 0.55;D 为白天时长(12 h);P_t 为日平均气温 T_a 下饱和蒸汽密度,可通过 T_a 计算得到(g·m^{-3})。

1963 年 Hamon[20]通过试验验证将无量纲的经验系数 C 修正为 0.65。

2.6 Turc 模型

Turc 模型(1961)[21]最初是针对欧洲西部湿润地区(相对湿度>50%)提出的,是一种基于辐射法的蒸发模型。

$$\lambda\rho_w\,E_0=0.369\frac{T_a}{T_a+15}(2.06R_s+50) \tag{11}$$

式中:E_0 为潜在蒸发量(mm·d^{-1});λ 为蒸发潜热(2.451MJ·kg^{-1});ρ_w 为水的密度(kg·m^{-3});R_s 为太阳辐射(MJ·m^{-2}·d^{-1});T_a 为日平均气温(℃)。

2.7 Penman-Monteith 模型

1965 年,Monteith 在 Penman 公式的基础上,根据能量平衡和水汽扩散理论研究推导了参照作物的潜在蒸散量,引入了表面阻力的概念,Penman-Monteith 模型公式[22]为:

$$\lambda E_0 = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p \dfrac{(e_s - e_a)}{\gamma_a}}{\Delta + \gamma\left(1 + \dfrac{\gamma_s}{\gamma_a}\right)} \quad (12)$$

式中：ρ_a 为大气平均密度（kg·m^{-3}）；c_p 为大气定压比热（J·kg^{-1}·K^{-1}）；γ_a 为空气动力学阻力（s·cm^{-1}）；γ_s 为表面阻力（s·cm^{-1}）；其它符号意义同 Penman 公式。

1998 年，FAO 提出计算参考作物潜在蒸散量标准公式 FAO56-Penman-Monteith 修正模型[23]，见式（13）。参考作物为均匀的草地，草高度为 0.12 m，表面阻力为 70 s·m^{-1}，反射率为 0.23。

$$E_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma\left(\dfrac{900}{T_{av} + 273}\right)u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (13)$$

式中：E_0 为潜在蒸发量（mm·d^{-1}）；Δ 为饱和水汽压与温度曲线斜率（kPa·℃$^{-1}$）；R_n 为表面太阳净辐射（MJ·m^{-2}·d^{-1}）；G 为土壤热通量（MJ·m^{-2}·d^{-1}）；T_{av} 为 2 m 高度处日平均气温（℃）；u_2 为 2 m 高度处平均风速（m·s^{-1}）；$(e_s - e_a)$ 为计算温度时的饱和水汽压与实际水汽压差（kPa）；γ 为干湿计常数（kPa·℃$^{-1}$）。

2.8 Priestley-Taylor 模型

Priestley-Taylor (1972) 模型[24]是在 Penman 模型基础上，假定无空气平流、地表上空空气饱和、地表土体饱和条件下建立起来的，见式（14），与 Penman 模型相比较，此模型空气动力学部分为 0，只有太阳辐射项。

$$E_0 = \alpha \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{(R_n - G)}{\lambda} \quad (14)$$

式中：E_0 为潜在蒸发量（mm·d^{-1}）；Δ 为饱和水汽压与温度曲线斜率（kPa·℃$^{-1}$）；R_n 为净辐射（MJ·m^{-2}·d^{-1}）；G 为土壤热通量，若按每天计算，G 可近似取为 0（MJ·m^{-2}·d^{-1}）；λ 为水汽化潜热，λ = 2.45 MJ·kg^{-1}；α 为修正系数，一般取 1.26。

2.9 Hargreaves-Samani 模型

美国学者 HARGREAVES 和 SAMANI[25]（1985）根据美国西北部加利福尼亚州地区蒸渗仪测量数据，建立此模型，它仅需要最高、最低气温来推算潜在蒸发量 E_0，模型公式的具体表达为式（15）。

$$E_0 = 0.0135 \times (KT) \times (T_{av} + 17.8) \times (T_{max} - T_{min})^{0.5} \times R_a / \lambda \quad (15)$$

$$T_{av} = (T_{max} - T_{min}) / 2$$

式中：E_0 为潜在蒸发量（mm·d^{-1}）；KT 为经验系数，取 0.17；T_{av}、T_{max} 和 T_{min} 分别为当天平均气温、最高气温和最低气温（℃）；R_a 为大气顶层辐射（MJ·m^{-2}·d^{-1}），可通过气温估算得到；λ 为水汽化潜热，λ = 2.45 MJ·kg^{-1}。

2.10 ASCE 标准 PM 模型

ASCE 标准 PM（2000）模型[26]是在 ASCE Penman-Monteith (1990) 模型[27]基础上提出的，用来计算参考作物潜在蒸发量标准公式，该模型简化、明确了计算参数的确定方法，将两种参考表面的潜在蒸发量计算综合为一个公式（式 16），即一个是低矮的草皮表面，标准高度为 0.12 m，一个是高一点的灌木表面，标准高度为 0.5m，计算尺度可为天，也可以为小时，通过系数 C_n 和 C_d 来转换。

$$E_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \dfrac{C_n}{T + 273} u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + C_d u_2)} \quad (16)$$

式中：E_0 潜在蒸发量（mm·d^{-1}或 mm·h^{-1}）；Δ 为饱和水汽压与温度曲线斜率（kPa·℃$^{-1}$）；R_n 为参考作物表面的净辐射（MJ·m^{-2}·d^{-1}或 MJ·m^{-2}·h^{-1}）；G 为土壤热通量（MJ·m^{-2}·d^{-1}或 MJ·m^{-2}·h^{-1}）；T为2.5m高度处日平均气温或1.5m高

表 1 C_n、C_d 取值

Tab. 1 Values for C_n and C_d

计算尺度	草皮作物（低矮）		灌木作物（高）		蒸发量单位	R_n、G 单位
	C_n	C_d	C_n	C_d		
天	900	0.34	1 600	0.38	mm·d^{-1}	MJ·m^{-2}·d^{-1}
小时（白天）*	37	0.24	66	0.25	mm·d^{-1}	MJ·m^{-2}·h^{-1}
小时（夜晚）*	37	0.969 6	66	1.7	mm·d^{-1}	MJ·m^{-2}·h^{-1}

注：* R_n≥0 的时段为白天，R_n <0 的时段为夜晚

度处小时平均气温(℃);u_2 为 2 m 高度处日平均风速或小时平均风速(m·s^{-1});e_s 为 2.5 m 高度或 1.5 m高度处平均气温下饱和水汽压(kPa);e_a 为 2.5 m高度或 1.5 m 高度处实际水汽压(kPa);γ 为干湿计常数(kPa·℃$^{-1}$);C_n 为随参考作物表面和计算时长而改变的分子常数;C_d 为随参考作物表面和计算时长而改变的分母常数(表 1[28])。

3　土体水分潜在蒸发量测量方法

土体水分蒸发量的测量可分为水文学法和微气象学法[5]。水文学法根据水量平衡原理,测量区域总蒸发量,包括蒸渗仪法、水量平衡法;微气象学法根据能量守恒或空气动力学方程,测定区域内相关微气象参数,根据蒸发理论模型计算蒸发量,主要是指波文比能量平衡法、空气动力学法、涡度相关法等。

3.1　蒸渗仪

蒸渗仪是一种设在田间(反映田间的自然环境)或室内(人工模拟自然环境)装满土壤的大型仪器,仪器中的土壤表面或者裸露,或者种植各种作物,用来测量裸土蒸发量或作物的腾发量、潜在腾发量以及深层渗漏量[28]。它是根据在一定时段内土体水量平衡的原理,确定不同时刻蒸渗仪土体总重量的变化,从而测定蒸散的方法。它可分为大型蒸渗仪和微型蒸渗仪。

大型蒸渗仪包括称重式和非称重式两种。非称重式蒸渗仪通过各种土壤水分测量技术测定土壤水分变化,用可控制的排水系统来定期测定排水量,例如供水式、注水式、新型压/吸气排水式等;称重式蒸渗仪下部安装有称重装置测定失水量,可在短时段内测定蒸发蒸腾量,具有很高的精度,由于蒸渗仪质量变化的测量方法是决定蒸发量测量精度的主要因素,因此近年来许多学者对大型蒸渗仪质量变化的感应方式加以研究,如智能称重、透射法测量土壤含水量、基于单片机为主控芯片的高精度蒸渗仪既可实时在线测量也可实时记录保存等[30]。

微型蒸渗仪是通过压入土中取样,再放入事先埋在土壤中的套筒内,经过一段时间后通过称量土样质量确定这一时段内土壤的蒸发量。微型蒸渗仪可直接测量作物棵间蒸发量,也可与大型蒸渗仪结合使用,间接测得作物的蒸腾量。其缺点是测量过程中要多次取出称重,并定期更换土壤,这易导致一定的人为误差,另外,测量结果受微型蒸渗仪的尺寸、材质、是否封底等影响[31]。

3.2　水量平衡法

水量平衡法是根据质量守恒原理,建立水量平衡方程,通过测定一定深度内土壤中水量的变化,利用降水量资料,即可推算出某时段内总的实际蒸散量。在干旱地区或季节,大气凝结水是确定蒸发量误差的原因之一;在短时期内,地表水径流及土壤水分交换会带来误差,故在多雨地区或季节里,不宜使用这种方法[32]。

3.3　波文比能量平衡法

波文比能量平衡法是依据表面能量守恒定律提出的,在一给定地表面,分配给显热的能量与分配给潜热蒸发的能量的比值相对是常数[33]。利用波文比能量平衡系统测定蒸发面净辐射、土壤热通量、两个不同高度处气温差及水汽压差,通过能量平衡方程及波文比即可计算出蒸发面与大气间的潜热和显热通量。该方法假定空气动量扩散系数、水汽湍流扩散系数和热量扩散系数相等,近地层大气只有垂直的温度和湿度梯度产生的垂直水汽输送,无水平梯度。测量要求下垫面水平均一,仪器安装高度有足够的风浪区长度[34]。

3.4　空气动力学方法

空气动力学法是利用近地表边界层相似理论,根据气象参数梯度和水汽湍流扩散系数求出潜热通量。其假设条件为水汽湍流扩散系数与空气动量扩散系数相等。空气动量扩散系数是通过测量不同高度风速来确定,由于近地面风速廓线的形状受大气稳定度影响,故很难保证其为不变的常数。

3.5　遥感法

遥感技术不能直接测量蒸发量,但对于一个区域可提供连续时段内的太阳辐射、地表植被覆盖和表面湿度温度信息,为蒸发量计算提供相关参数。利用遥感技术估算蒸发量可采用这样几种方法:地表能量平衡余项法、与传统方法相结合模型、微分热惯量模型。

地表能量平衡余项法利用遥感观测数据,估算地表的净辐射量、土壤热通量和感热通量,再根据能量平衡推求潜热通量。典型的方法有:ROERINK G J 提出简化的地表能量平衡指数模型[35],在计算感热和潜热时,利用极干时和极湿时的温度差值比定义蒸发比;荷兰学者 SU Z[36] 提出地表能量平衡系统模型,利用相似理论确定平均风速度和平均温度,

根据极限状态显热通量计算相对蒸发比,极湿状态下潜热通量乘以相对蒸发比就得到蒸发潜热。

传统方法与遥感技术相结合模型,就是利用遥感数据反演得到的归一化植被指数、地表温度或地表温差,结合已有蒸发模型公式计算地面蒸发量。

微分热惯量模型[37]旨在用全遥感数据反演蒸发量,减小以往遥感方法里确定非遥感数据的误差,如参考高度的气温、风速等。其基本原理是以微分热惯量提取独立于土壤性质的土壤水分可供率,用土壤水分可供率计算波文比,用表观热惯量和地表净辐射确土壤热通量,实现全遥感信息反演潜在蒸发量。利用遥感信息反演蒸发量,也存在一些问题,如地表温度的反演精度、时间尺度的扩展和空间尺度的转换等。

3.6 涡度相关法

涡度相关是指某种物质的垂直通量,即这种物质的浓度与其垂直速度的协方差[38]。涡度相关法是应用超声风速仪、快速响应的湿度计和温度计、数据采集系统等,观测大气与植物群落气体交换通量,此方法已成为直接测定地表与大气间水汽交换通量的标准方法。利用涡度相关仪测量垂直风速与水汽浓度和温度的协方差,便可求出对应的垂直水汽通量或蒸发量[39]。它可对地表的蒸发量进行长期、短步长、连续的观测;观测时下垫面要平坦、均匀,否则要进行平流校正。涡度相关系统测定蒸发量存在低估现象,应用时需进行能量平衡闭合分析。

4 结语与展望

本文归纳了潜在蒸发模型的理论公式及蒸发量的测量方法。潜在蒸发模型理论公式涉及多种气象参数及经验系数,总结了气象参数的确定方法及经验参数的取值范围;分析蒸发各种测量方法的适用条件及优缺点,得出如下几点认识:

(1)虽然确定潜在蒸发的理论模型很多,但由于诸多的气象因素决定潜在蒸发量,每一种理论模型不能考虑全部因素,均在一定的假设前提下建立的,有各自的适用范围,选择合适的蒸发模型是正确估算潜在蒸发量的首要条件。文献[40]计算结果表明不同的蒸发模型计算的潜在蒸发量可相差 500 mm · a^{-1}之多,文中提出适合于西班牙东北部半干旱多风地区的 Hargreaves-Samani 模型,并不适用于美国东南部潮湿、温暖地区。针对特定的地区、特定的气候条件下,通过多种理论模型对比分析,确定相对合适的理论模型估算潜在蒸发量是必要的。

(2)潜在蒸发理论模型中气象参数的确定可通过气象资料推导得出,但必须考虑气象参数的修正及其区域性。为了确保蒸发量计算结果的精确度,对于气象参数要进行修正,即根据实测水量平衡或标准蒸发量计算公式(如 FAO56 – PM 公式)来修正。气象参数的区域性很明显,即使是具有相似气候特征的小区域,不同的气象站提供的气象资料反演的气象参数也不相同,决定了利用相同的理论模型得出的潜在蒸发量亦不同。不同的理论模型可能含有相同的气象参数,但根据气象资料反演两者的数值不一定相等。文献[9]中 7 个有效蒸发模型均采用区域平均参数来估计蒸发量,与该区域即加拿大安大略省西北部 4 个气象站观测数据相比较,相对误差均超过 20%,这说明模型参数具有区域性,尽管在不太大的范围内利用区域平均参数也可能导致较大的误差。

(3)现有蒸发测量技术主要是针对农田蒸散、水面蒸发、大范围的陆面蒸发蒸腾,这些技术应用于岩土工程或地质工程中的蒸发测量中有待进一步深入研究发展,如小范围岩土工程蒸发测量技术的精度要求会更高;除了测量总蒸发量更关注地表下不同深度处水分的变化情况,进而研究蒸发速率对土体性质的影响规律。

尽管土体潜在蒸发理论模型研究已取得大量的成果,但大多是针对农业、气象领域而提出的,直接将此应用于岩土工程领域仍存在一定的不足。鉴于此,本文提出该领域今后的研究可以从以下几方面开展:

(1)土体稳定蒸发阶段蒸发过程研究。现有成果认为稳定蒸发阶段蒸发量,即潜在蒸发量是不变的,只与外界气象因素有关,很少考虑土性对此的影响。土体表面饱和时,可认为处于稳定蒸发阶段,此时土体内部水分由毛细渗流作用和水蒸气的扩散作用向土体表层传输,当土体表面达到非饱和时,稳定蒸发阶段结束,很明显这一阶段的长短不仅受气象因素的影响,还与土体内部水分传输至土体表层水量的多少、传输速率等有关。

(2)蒸发的滞后效应研究。现有潜在蒸发理论模型公式涉及诸多气象参数,如辐射、温度、湿度等气象参数,这些气象参数的日变化不是常数,均呈波动趋势,蒸发的开始发生滞后于气象参数变化,不同

土壤对不同气象参数的滞后时间也不尽相同,需要确定具体滞后时间。文献[41]确定了 4 种土样相对于温度、净辐射的蒸发滞后时间,得出滞后时间是由不同蒸发下垫面的热力学性质决定的。

(3)夜间土体水分变化对蒸发速率的影响。现有成果认为夜晚温度低、没有辐射,因此蒸发近似于零,也没有考虑夜间土体水分变化情况。实际上,在白天地表蒸发作用下,带动地下气态水向地表迁移,到夜晚温度降低时,特别是昼夜温差较大地区,夜晚温度降至露点,地表下浅层气态水会凝结变成液态水,导致浅层土体含水率增加,为白天的蒸发提供更多的水源,进而影响白天的蒸发速率。文献[41]提出,对于物理特征相似的土样,在白天最高气温相同的情况下,气温昼夜差异越大,日蒸发量越大。

(4)通用蒸发理论模型的研究。虽然已有的潜在蒸发理论模型很多,但都是在大量的假设前提下,针对特定的气候环境提出的,适用范围有限。如 Peman 模型是根据位于湿润海洋性季风气候下的气象数据推导建立的,不适合于我国西北干旱半干旱地区。另外,正如文献[2]中描述一样,一些模型中含有经验参数或难以取得的参数,均限制了该类模型的应用和推广。因此,有必要进一步研究适合大多数气候条件下的通用潜在蒸发理论模型。

(5)蒸发测量尺度效应的研究。现场实测蒸发量能够较准确反映实际蒸发情况,由于实测蒸发只是在一定尺度的范围内进行的,其结果能否反映更大范围内的蒸发情况,如何将小尺度的观测结果扩展并应用于更大范围,以便指导实际工程;气象观测数据也存在类似问题,将气象参数观测尺度修正至实测蒸发量现场相同的尺度,以期用现场实测蒸发量检验蒸发理论模型。针对这种尺度效应的研究,建立多尺度之间的转换关系,将会更充分发挥实测蒸发量在工程应用、蒸发理论模型检验中的价值。文献[42]提出尺度效应问题的解决是融合多尺度遥感观测结果的基础。

参考文献(References)

[1] 张晓琳,熊立华,林琳,等. 五种潜在蒸散发公式在汉江流域的应用[J]. 干旱区地理,2012,35(2):229 – 237. [ZHANG Xiaolin,XIONG Lihua,LIN lin,et al. Application of five potential evapotranspiration equations in Hanjiang Basin [J]. Arid Land Geography,2012,35(2):229 –237.]

[2] 欧阳斌强,唐朝生,王德银,等. 土体水分蒸发研究进展[J]. 岩土力学,2016,37(3):625 – 636. [OUYANG Binqiang,TANG Chaosheng,WANG Deyin,et al. Advances on soil moisture evaporation[J]. Rock and Soil Mechanics,2016,37(3):625 –636.]

[3] 宋晓猛,张建云,占车生,等. 气候变化和人类活动对水文循环影响研究进展[J]. 水利学报,2013,44(7):779 – 790. [SONG Xiaomeng,ZHANG Jianyun,ZHAN Chesheng,et al. Review for impacts of climate change and human activities on water cycle[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2013,44(7):779 –790.]

[4] 张晓. 感热平衡原理测定土壤水分蒸发的改进及分解农田蒸散的实验研究[D]. 北京:中国农业大学,2014. [ZHANG Xiao. Improvement of sensible heat balance theory for determining soil water evaporation and partitioning field evapotranspiration[D]. Beijing:China Agricultural University,2014.]

[5] 赵玲玲,夏军,许崇育,等. 水文循环模拟中蒸散发估算方法综述[J] . 地理学报,2013,68(1):127 – 136. [ZHAO Lingling,XIA Jun,XU Chongyu,et al. A review of evapotranspiration estimation methods in hydrological models[J]. Acta Geographica Sinica,2013,68(1):127 –136.]

[6] 孟春雷. 陆面过程模式中土壤蒸发与水热耦合传输的进一步研究[D]. 北京:北京师范大学,2006. [MENG Chunlei. Land surface modeling with enhanced considerations of soil evaporation and coupled transport of soil moisture and heat[D]. Beijing:Beijing Normal University,2006.]

[7] PHILIP J R. Evaporation and moisture and heat fields in the soil [J]. Journal of Meteorology,1957,14:354 –366.

[8] IDSO S B,REGINATO R J,JACKSON R D,et al. The three stages of drying of a field soil[J]. Soil Science Society of America Journal,1974,38(5):831 –837.

[9] SINGH V P,XU C Y. Evaluation and generalization of 13 mass-transfer equations for determining free water evaporation [J]. Hydrological Processes,1997,14:311 –323.

[10] BOSEN J F. A formula for approximation of the saturation vapor pressure over water[J]. Monthly Weather Review,1960,88(8):275 –276.

[11] 史海匀,傅旭东,王远见,等. 拉萨河流域蒸发力估算:改进道尔顿模型[J]. 应用基础与工程科学学报,2012,20(2):219 –227. [SHI Haiyun,FU Xudong,WANG Yuanjian,et al. Estimating potential evaporation in Lhasa River Basin:Improved dalton model [J]. Journal of Basic Science and Engineering,2012,20(2):219 –227.]

[12] 陈惠泉,毛世民. 水面蒸发系数全国通用公式的验证[J]. 水科学进展,1995,6(2):116 –120. [CHEN Huiquan,MAO Shimin. Calculation and verification of an universal water surface evaporation coefficient formula[J]. Advances in Water Science,1995,6(2):116 –120.]

[13] SLAVISA Trajkovic. Temperature-based approaches for estimating reference evapotranspiration[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering,2005,131(4):316 –323.

[14] ANTONIO Roberto Pereira,WILLIAM Oregon Pruitt. Adaptation of the thornthwaite scheme for estimating daily reference evapotrans-

piration[J]. Agricultural Water Management, 2004,66(3):251 - 257.

[15] 王永东,邱永志,许波,等.参考作物蒸散量计算方法在极端干旱区的适用性[J].干旱区研究,2014,31(3):390 - 396. [WANG Yongdong, QIU Yongzhi, XU Bo, et al. Reference crop evapotranspiration in hinterland of the Taklimakan Desert[J]. Arid Zone Research,2014,31(3):390 - 396.]

[16] ALLEN R G. A penman for all seasons[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering,1986,112(4):348 - 368.

[17] DOORENBOS J, PRUITT W O. Guidelines for predicting crop water requirements, FAO Irrigation and Drainage Paper 24 [M]. Rome: United Nations Food and Agriculture Organization,1977.

[18] XU C Y, SINGH V P. Cross comparison of empirical equations for calculating potential evapotranspiration with data from Switzerland [J]. Water Resources Management, 2002,16(3):197 - 219.

[19] HAMON W R. Estimating potential evapotranspiration[J]. Journal of Hydraulics Division Proceeding of ASCE,1961,87:107 - 120.

[20] HAMON W R. Computation of direct runoff amounts from storm rainfall [J]. International Association of Scientific Hydrology, 1963,63:52 - 62.

[21] DOUGLAS E M, JACOBS J M, SUMNER D M, et al. A comparison of models for estimating potential evapotranspiration for Florida land cover types[J]. Journal of Hydrology,2009,373(3):366 - 376.

[22] MONTEITH J L. Evaporation and the environment [C] // XIX Symposium, Society of Experimental Biology. Cambridge: Cambridge University Press,1965:205 - 234.

[23] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements, FAO Irrigation and Drainage Paper No 56[M]. Rome: United Nations Food and Agriculture Organization,1998.

[24] PRIESTLEY C H B, TAYLOR R J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters[J]. Monthly Weather Review,1972,100(2):81 - 92.

[25] HARGREAVES G H, SAMANI Z A. Reference crop evapotranspiration from temperature[J]. Applied Engineering in Agriculture, 1985,1(2):96 - 99.

[26] ITENFISU D, ELLIOTT R L, ALLEN R G, et al. Comparison of reference evapotranspiration calculations as part of the ASCE standardization effort[J]. Journal of Irrigation & Drainage Engineering, 2003, 129(6):440 - 448.

[27] JENSEN M E, BURMAN R D, ALLEN R G. Evapotranspiration and irrigation water requirements: ASCE manuals and reports on engineering practice No. 70[M]. New York: ASCE,1990.

[28] IRMAK S, HOWELL T A, ALLEN R G, et al. Standardized ASCE penman-monteith: Impact of sum-of-hourly vs. 24-hour time step computations at reference weather station sites[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers,2005,48(3):1063 - 1077.

[29] 赵华.不同尺寸蒸渗仪测定农田蒸散量的对比及冠层阻力的模拟研究[D].南京:南京信息工程大学,2015. [ZHAO Hua. Measurement of crop evapotranspiration via lysimeters with different diameters and simulation of canopy resistance[D]. Nanjiang: Nanjing University of Information Science & Technology,2015.]

[30] 刘翠红,戴红武,胡艳清,等.蒸渗仪的研究与应用现状[J].农机化研究,2014,(8):228 - 231. [LIU Cuihong, DEI Hongwu, HU Yanqing, et al. Research and application of the status of lysimeter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, (8):228 - 231.]

[31] 李王成,王为,冯绍元,等.不同类型微型蒸发器测定土壤蒸发的田间试验研究[J].农业工程学报,2007,23(10):6 - 13. [LI Wangcheng, WANG Wei, FENG Shaoyuan, et al. Field experimental study on the measurement of soil evaporation using different types of micro-lysimeters[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2007,23(10):6 - 13.]

[32] 信迺诠,王世耆.关于农田蒸发测量方法及其应用的评价[J].干旱地区农业研究,1987,(4):61 - 68. [XIN Naiquan, WANG Shiqi. Evaluation of the surveying, methods of evaporation and their application to farmlands[J]. Agricultural Research in the Arid Areas,1987,(4):61 - 68.]

[33] 王笑影.农田蒸散估算方法研究进展[J].农业系统科学与综合研究,2003,19(2):81 - 84. [WANG Xiaoying. Study of the estimating methods for evapotranspiration in farmland [J]. System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture,2003,19(2): 81 - 84.]

[34] 王毅勇,杨青,张光,等.三江平原大豆田蒸散特征及能量平衡研究[J].中国生态农业学报,2003,11(4):82 - 86. [WANG Yiyong, YANG Qing, ZHANG Guang, et al. Characteristics of evapotranspiration and energy budget of soybean field in the Sanjiang Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture,2003,11(4):82 - 86.]

[35] ROERINK G J, SU Z, MENENTI M. S - SEBI: A simple remote sensing algorithm to estimate the surface energy balance[J]. Physics & Chemistry of the Earth Part B Hydrology Oceans & Atmosphere,2000,25(2):147 - 157.

[36] SU Z. The surface energy balance system (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes [J]. Hydrology & Earth System Sciences, 2002,6(1): 85 - 99.

[37] 张仁华,孙晓敏,朱治林,等.以微分热惯量为基础的地表蒸发全遥感信息模型及在甘肃沙坡头地区的验证[J].中国科学(D辑),2002,32(12):1041 - 1050. [ZHANG Renhua, SUN Xiaomin, ZHU Zhilin, et al. A remote sensing model for monitoring soil evaporation based on thermal inertia and its validation[J]. Science in China (Series D),2002,32(12):1041 - 1050.]

[38] 刘晨峰,张志强,查同刚,等.涡度相关法研究土壤水分状况对沙地杨树人工林生态系统能量分配和蒸散日变化的影响[J].生态学报,2006,26(8):2549 - 2557. [LIU Chenfeng, ZHANG Zhiqiang, ZHA Tonggang, et al. Soil moisture affects energy allocation and diurnal evapotranspiration of a poplar plantation: An eddy-covariance-based study[J]. Acta Ecologica Sinica,2006,26(8):

2549 – 2557.]

[39] 李思恩,康绍忠,朱治林,等. 应用涡度相关技术监测地表蒸发蒸腾量的研究进展[J]. 中国农业科学,2008,(9):2720 – 2726. [LI Sien, KANG Shaozhong, ZHU Zhilin, et al. Research progress of measurement of land surface evapotranspiration based on eddy covariance technology[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008,(9):2720 – 2726.]

[40] LU Jianbiao, GE Sun, STEVEN G, et al. A comparison of six potential evapotranspiration methods for regional use in the southeastern United States[J]. Journal of the American Water Resources Association,2005,41(3):621 – 633.

[41] 李婉歆. 不同岩性饱和裸土潜在蒸发量规律研究[D]. 西安:长安大学,2017. [LI Wanxi. The law of potential evaporation between different saturated soils[D]. Xi'an: Chang'an University, 2017.]

[42] LI Zhaoliang, TANG Ronglin, WAN Zhengming, et al. A review of current methodologies for regional evapotranspiration estimation from remotely sensed data[J]. Sensors,2009,(9):3801 – 3853.

Advances on determining potential evaporation of soil moisture

XIA Qiong[1], WANG Xu[1], DOU Shun[2], FU Xiao-dan[1]

(1 *School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou* 730070, *Gansu, China*;
2 *Northwest Research Institute Co. Ltd of CREC, Lanzhou* 730000, *Gansu, China*)

Abstract: Based on the research achievements on potential evaporation model for soil moisture in related disciplines, and combining with the characteristics of evaporation process in geotechnical engineering field, the advances on determining potential evaporation of soil moisture are summarized, and the application conditions and how to determine the parameters in estimating potential evaporation are analyzed. The knowledge is shown as follows: (1) Under specific climate condition in specific regions, it is necessary to select relatively appropriate theoretical model to estimate potential evaporation by comparing various theoretical models. (2) Meteorological parameters are regional obviously, even in a small region with fairly similar climates, different inversion meteorological parameters could be drawn with meteorological data from different stations, so inversion meteorological parameters should be calibrated. (3) A thorough study should be performed for evaporation measurement technology in geotechnical engineering field. The research topics in geotechnical engineering field in future are provided, including the evaporation mechanism of stable stage, the hysteresis effect of evaporation, the effect of moisture change on evaporation at night, construction of universal soil moisture evaporation theoretical model and the scale effect of evaporation measurement.

Key words: potential evaporation; evaporation process; theoretical model; evaporation measurement